

# CÁLCULO DEL CAMPO ACÚSTICO PRODUCIDO POR UN SISTEMA DE PROPULSIÓN COHETE

M. A. Martinez

Departamento de Aeronáutica - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata

Calle 116 e/47 y 48 S/N- La Plata - Argentina

Email: mmartinezk@ing.unlp.edu.ar

## RESUMEN

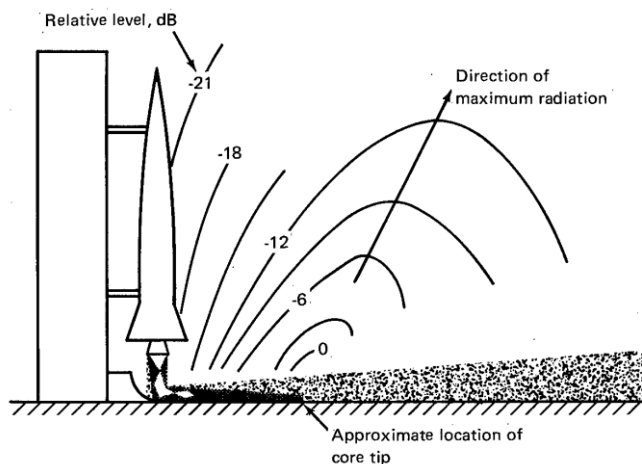
*El cálculo de la potencia acústica y su espectro de frecuencias, para diversos puntos del espacio alrededor de un motor cohete, es de vital importancia para el éxito de una misión espacial. Una excesiva potencia de sonido en alguna zona sensible del vehículo podría afectar sistemas vitales para la misión. Es de especial importancia conocer la distribución de la energía en el espectro de frecuencias, ya que el acoplamiento con alguna de las frecuencias naturales de la estructura del vehículo debe ser evitado. La Potencia acústica emitida varía según la dirección, la distancia y el movimiento de la fuente de sonido. Por esto último, la peor condición suele encontrarse en el momento del lanzamiento, cuando el vehículo está quieto y el chorro es desviado, acercándolo a la estructura.*

*En el presente trabajo se muestra la implementación de un método de distribución de fuentes acústicas propuesto por K. Eldred para la NASA en la década del 70, y mejorado por J. Haynes y J. Kenny en 2009. El mismo se aplicará a un vehículo espacial propulsado por tres motores de 35 toneladas de empuje, y será implementado mediante un software creado "Ad Hoc" que permite reemplazar las curvas y fórmulas utilizadas hace cuarenta años por tecnología actual.*

**Palabras clave:** Acústica, pluma, cohete.

## INTRODUCCIÓN

Las cargas acústicas generadas por el sistema de propulsión de un lanzador espacial deben ser seriamente consideradas, ya que las mismas pueden ser causa de importantes problemas en la primera parte de la misión. Cuando el vehículo se encuentra aún en tierra con sus motores encendidos, estos irradian fuertes ondas de sonido cuya intensidad varía según la dirección, respecto del eje del flujo.



**Figura 1.** Pluma del cohete y curvas de nivel de intensidad acústica (Eldred, 1971)

El malfuncionamiento de equipos electrónicos y la fatiga de estructuras son los principales deterioros que las ondas acústicas pueden causar. Se han propuesto diversos métodos para calcular el campo acústico alrededor de un motor, el más exitoso ha sido el método de colocación de fuentes propuesto por K. Eldred [1] en la década del '70 y mejorado por J. Haynes y J. Kenny en 2009 [2]. Se trata de un método semiempírico, basado en datos experimentales obtenidos de numerosos ensayos y lanzamientos. Mediante este método los mismos son utilizados para predecir el campo acústico alrededor de otros motores. El método original se aplicaba mediante la utilización de diversas fórmulas y curvas experimentales, típicas de la época en la que fue propuesto. Para la implementación del mismo de un modo más acorde con las tecnologías actuales, agilizando el cálculo y minimizando la probabilidad de cometer errores, se ha creado un software específicamente para este trabajo.

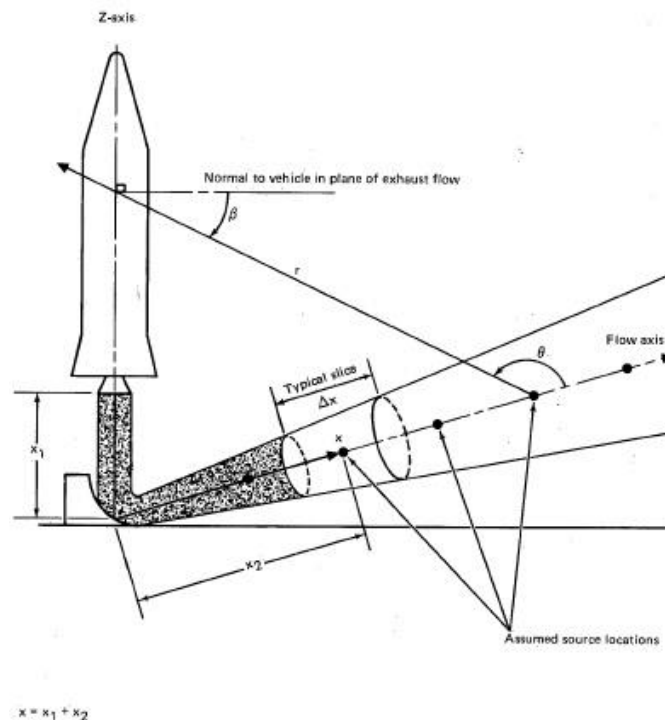
En las siguientes secciones mostraremos detalladamente la aplicación de este método a un lanzador espacial propulsado por tres motores de treinta toneladas cada uno. Posteriormente, se mostrarán los resultados obtenidos con el mismo.

## METODOLOGÍA

El método empleado consiste, básicamente, en localizar la trayectoria del núcleo de la pluma y colocar a lo largo de la misma una serie de fuentes acústicas que emiten, cada una, con una determinada intensidad y en un determinado espectro de frecuencias. A partir del sonido emitido por esas fuentes se calcula la potencia que llega cada punto del espacio para cada frecuencia.

El método propuesto por K. Eldred establece los siguientes pasos:

**Paso 1.** Determinar el eje del flujo(Figura 2)



**Figura 2.** Eje del flujo de escape (de Eldred, 1971)

**Paso 2.** Estimar la potencia acústica total [Watt] mediante la expresión

$$W_{OA} = 0,005nFU_e = 1.147 \times 10^7 \text{ Watt}$$

donde:  $F = \text{Empuje del motor} = 294.000 \text{ N}$   
 $n = \text{número de toberas} = 3$   
 $U_e = \text{Velocidad de salida totalmente expandida} = 2600 \text{ m/seg}$

**Paso 3.** Calcular el nivel de potencia acústica total [dB]

$$L_w = 10 \log W_{OA} + 120 = 191 \text{ dB} \quad (\text{ref. } 10^{-12} \text{ Watt})$$

**Paso 4.** Calcular el diámetro equivalente si el vehículo tiene más de un motor

$$d_e = \sqrt{n} d_{ei}$$

**Paso 5.** Determinar la longitud del núcleo de la pluma

En el método original según Eldred(1) la longitud del núcleo de la pluma se debe calcular según la expresión

$$\frac{X_t}{d_e} = 3,45 (1 + 0,38M_e)^2$$

posteriores modificaciones realizadas por el ingeniero francés Jean Varnier(2)(3) dan cuenta de que esta longitud se ajusta mejor a la expresión:

$$\frac{X_t}{d_e} = 1,75(1 + 0,38M_e)^2$$

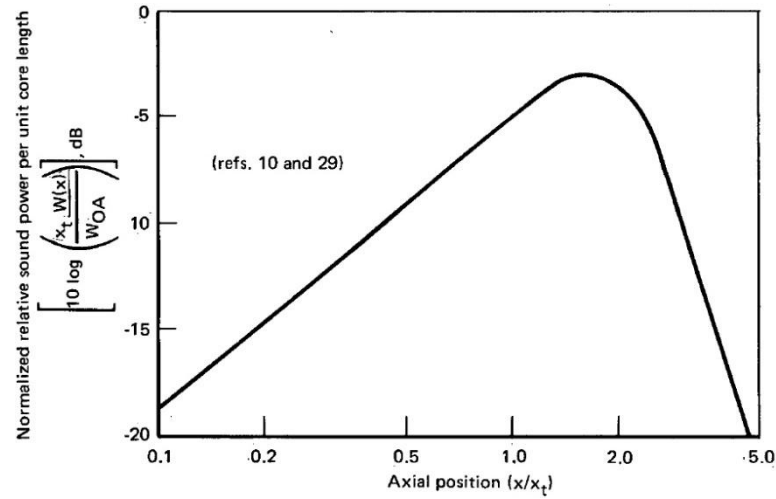
Nuevos estudios realizados por Haynes y Kenny (2) demuestran que la expresión propuesta por Varnier es útil hasta el punto en que el chorro impacta en el deflector. El núcleo de la pluma termina en el deflector.

Según este criterio se considerará para nuestro cálculo:

$$X_t = 19,72 \text{ m sin deflector}$$
$$X_t = 5,25 \text{ m con deflector}$$

**Paso 6.** Se divide el núcleo de la pluma en un número de 20 segmentos como se observa en la Figura 2.

**Paso 7.** Obtener la potencia acústica normalizada por la longitud del núcleo a partir de un gráfico experimental. Dicho gráfico, correspondiente al documento (1) de Eldred. En la presente implementación de este método se ha digitalizado el gráfico generado una función definida por tramos para representar analíticamente sus valores.

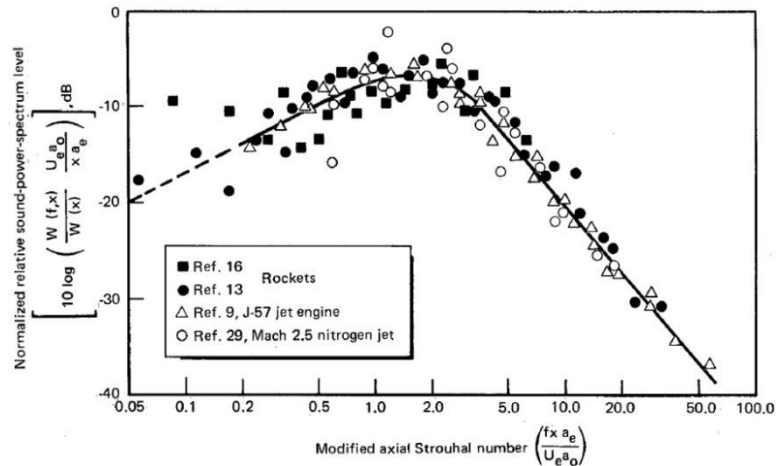


**Figura 3.-** Potencia acústica normalizada por unidad de longitud de núcleo. (deEldred, 1971)

**Paso 8.** Calcular la potencia acústica total para cada segmento a partir de una expresión matemática.

$$L_{w,s} = 10 \log \left[ \frac{x_t W(x)}{W_{OA}} \right] + L_w + 10 \log \frac{\Delta x}{x_t}, \quad [dB] \text{ (ref } 10^{-12} W)$$

**Paso 9.** Convertir el espectro acústico obtenido en forma empírica a uno convencional para cada segmento



**Figura 4.-** Espectro normalizado

$$L_{w,s,b} = 10 \log \left[ \frac{W(f,x)}{W(x)} \frac{U_e a_o}{x a_e} \right] + L_{ws} - 10 \log \frac{U_e a_o}{x a_e} + \log \Delta f_b, \quad [dB] \text{ (ref } 10^{-12} W)$$

donde:

$W(f, x)$  = Potencia sonora por Hz por unidad de longitud axial a una distancia  $x$  a lo largo del eje del flujo, W/Hz/m

$x$  = distancia a lo largo del eje del flujo desde la tobera hasta el centro de la sección, s.

$a_o$  = velocidad del sonido en la atmósfera, m/seg

$a_e$  = velocidad del sonido en el flujo a la salida de la tobera, m/seg

**Paso 10.** Calcular el nivel de potencia acústica aportado por cada segmento para cada banda de frecuencias para cada punto del espacio

$$SPL_{s,b,p} = L_{w,s,p} - 10 \log r^2 - 11 + DI(b, \theta)$$

**Paso 11.** Calcular el nivel de potencia acústica para cada banda de frecuencias para punto sumando la contribución de todas las fuentes

$$SPL_{b,p} = 10 \log \sum_s \text{antilog} \frac{SPL_{s,b,p}}{10}$$

donde:  $SPL_{b,p}$  =  $SPL$  total en la banda de frecuencia  $b$  en el punto,  $p$ , dB  
(ref  $20 \mu Pa$ )

**Paso 12.** Calcular el nivel de potencia acústica total en cada punto,  $p$ , por suma logarítmica de  $SPL_{b,p}$ .

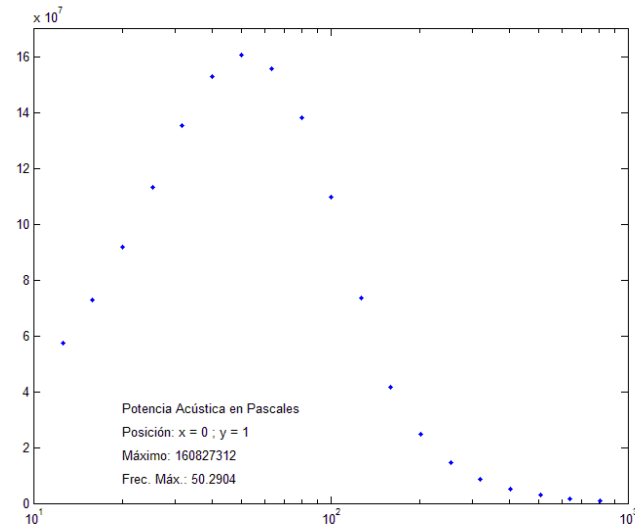
$$SPL_{OA,p} = 10 \log \sum_b \left[ \text{antilog} \frac{SPL_{b,p}}{10} \right], \quad dB \text{ (ref } 20 \mu Pa)$$

Como puede observarse este es un método semiempírico. Se utilizan datos obtenidos en ensayos reales que son extrapolados, adaptándolos a casos diferentes.

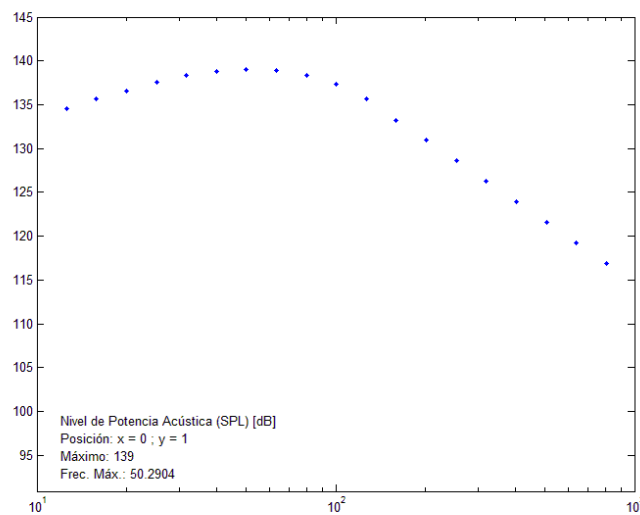
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El principal resultado que se obtiene a partir de este método es la Potencia Acústica (en Pascales, o su nivel en dB) y la distribución de la misma en el espectro de frecuencias. Esta distribución es muy importante a los efectos de evaluar posibles efectos de resonancia y no es obtenible mediante otros métodos que se limitan a ofrecer la Potencia Total.

En la Figura 5 se observa el espectro de frecuencias de la Potencia Acústica correspondiente a un arreglo de tres motores de 294000N dispuestos en triángulo. El flujo es deflectado  $100^\circ$  a una distancia de 5,25 metros (correspondiente a 3,5 diámetros de tobera). La Figura 6 muestra el Nivel de Potencia Acústica (SPL) correspondiente al mismo caso. Ambos para un observador situado un metro por encima del nivel de las toberas.

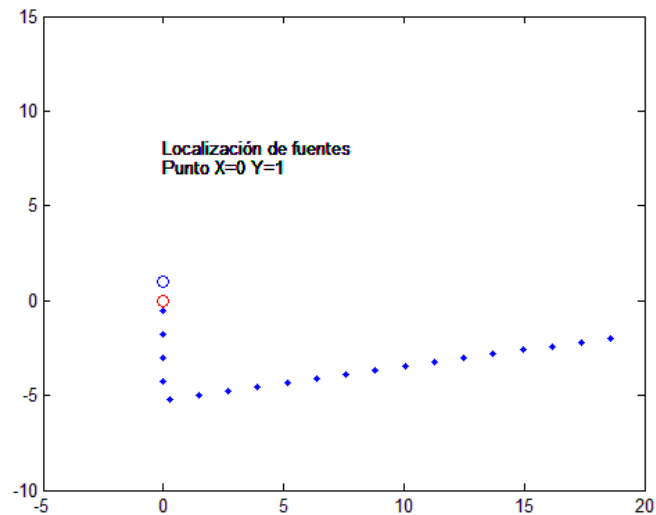


**Figura 5.-** Potencia Acústica en Pascales



**Figura 6.-** Nivel de Potencia Acústica [dB]

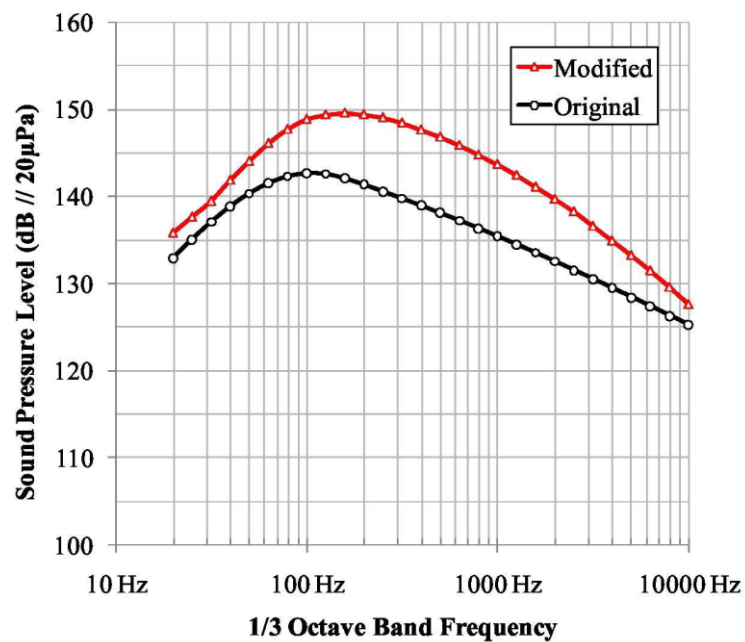
En la Figura 7 puede observarse la disposición de las fuentes sonoras para el problema que utilizamos de ejemplo. Puede verse las primeras cuatro alineadas verticalmente y las restantes deflectadas  $100^\circ$ . Asimismo, pueden verse dos círculos que representan la salida de la tobera (inferior/rojo) y la posición del observador (superior/azul).



**Figura 7.-** Localización de fuentes

La rapidez con la que el software realiza los cálculos permite probar diferentes configuraciones en diferentes situaciones. La variación de la distancia entre la tobera y el deflector y la supresión final del mismo permite simular los efectos de un despegue hasta el vuelo alejado de obstáculos.

Se han comparado los resultados obtenidos para este vehículo ficticio con los obtenidos por Haynes y Kenny (4). Lamentablemente, los autores no incluyen en la publicación todos los datos necesarios para reproducir el modelo que utilizaron, que corresponde al Ares I. No pudiéndose realizar una verificación cuantitativa de los resultados nos hemos limitado a realizar una verificación cualitativa. Observando la Figura 8 vemos, para el método modificado, un perfil de características similares al nuestro pero con una intensidad máxima algo mayor situada a una frecuencia algo mayor. Esto es congruente con el Ares I que es un vehículo propulsado por un único motor de 17.700.00N.



**Figura 8.-** Predicción de Haynes & Kenny para el Ares I

## CONCLUSIONES

El software diseñado permite la implementación del método de Eldred con agilidad, y obtener los resultados con gran precisión. Los resultados obtenidos son, a priori, compatibles con el tipo de vehículo y el sistema de propulsión especificado y la comparación cualitativa realizada con los cálculos realizados por otros autores con el mismo método resultan congruentes.

**Precisión:** La digitalización del método permite su implementación con una precisión mucho mayor que haciéndolo a mano, debido a que se minimiza el error humano, tanto de cálculo como de lectura de gráficas y de redondeo, que afectan seriamente los resultados obtenidos por el método clásico.

**Repetibilidad:** Al eliminar el error humano mencionado anteriormente los cálculos se vuelven perfectamente repetibles. Puede hacerse pequeñas variaciones en los datos de entrada y volver atrás según sea necesario.

**Velocidad:** La realización de un cálculo en forma manual puede demandar varias horas, mientras que con el software este tiempo se reduce a un fracción de minuto.

Se concluye que la implementación del método es eficiente y resulta de gran utilidad.

## REFERENCIAS

1. K. Eldred: "Acoustic loads generated by the propulsion system"; 1971, NASA SP-8072 (*Monografía*)
2. J. Haynes y J. Kenny : "Modifications to the NASA SP-8072 Distributed Source Method II for Ares I Lift-off Environment Predictions"; 2009, AIAA Aeroacoustics conference. (*Paper*)
3. M. J. Lighthill: "On sound generated aerodynamically, Part I, general theory"; 1952, Proceedings of the Royal Society of London. (*Paper*)
4. J. Varnier: "Noise Radiated from Free and Impinging Hot Supersonic Jets"; 1998, AIAA 98-2206 (*Paper*)



## APÉNDICE A

Resultados de los cálculos para el modelo con deflector desviando el chorro 100°

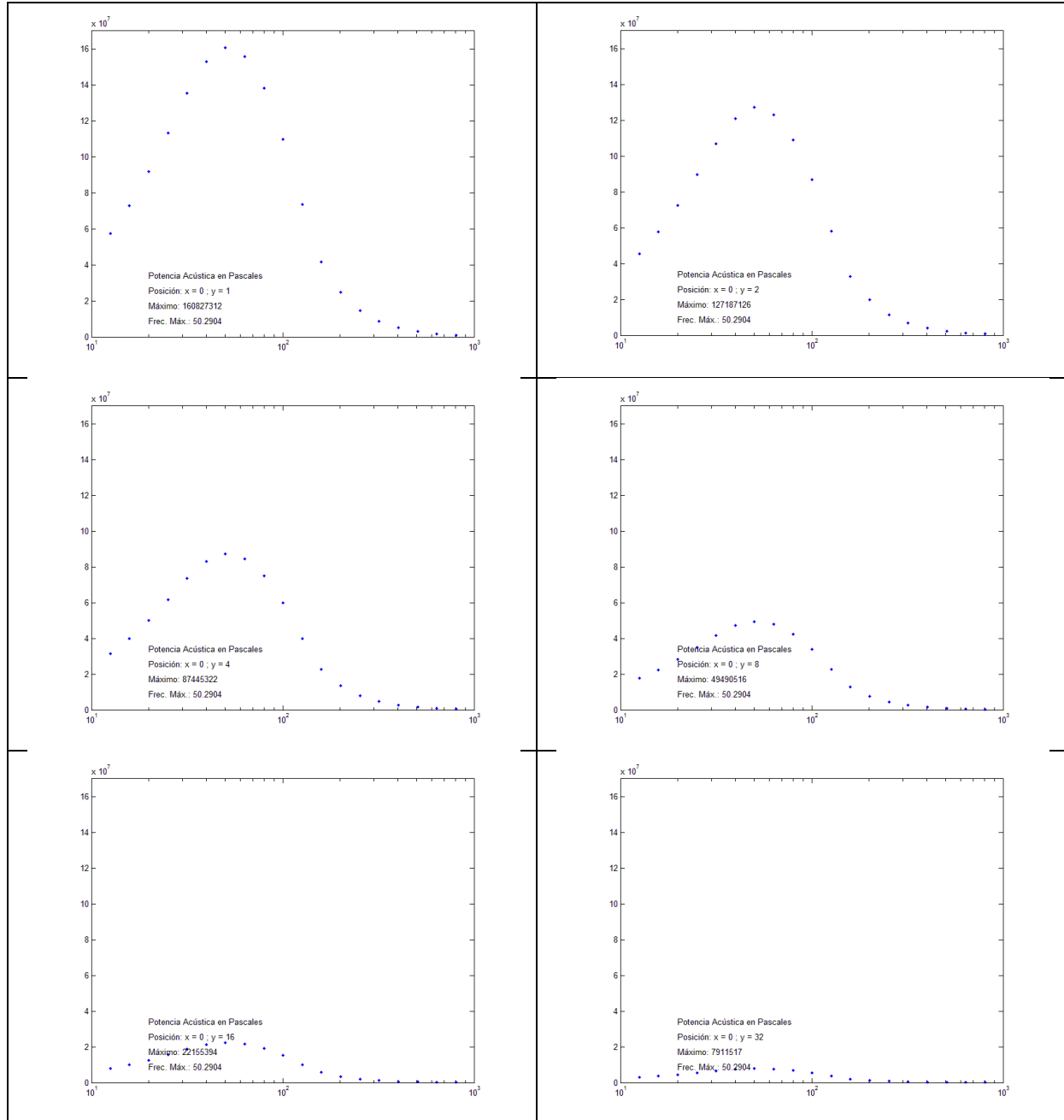
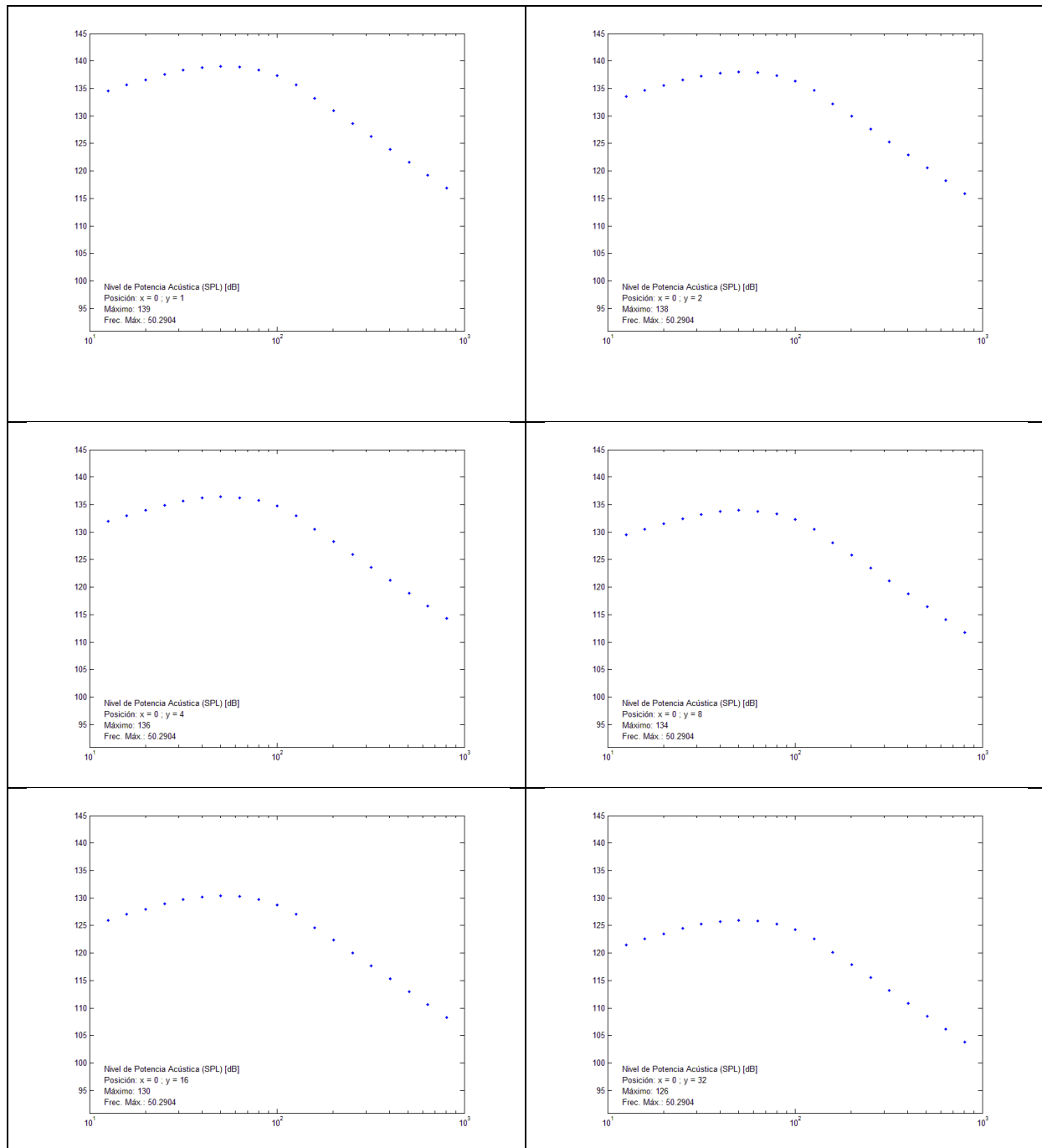


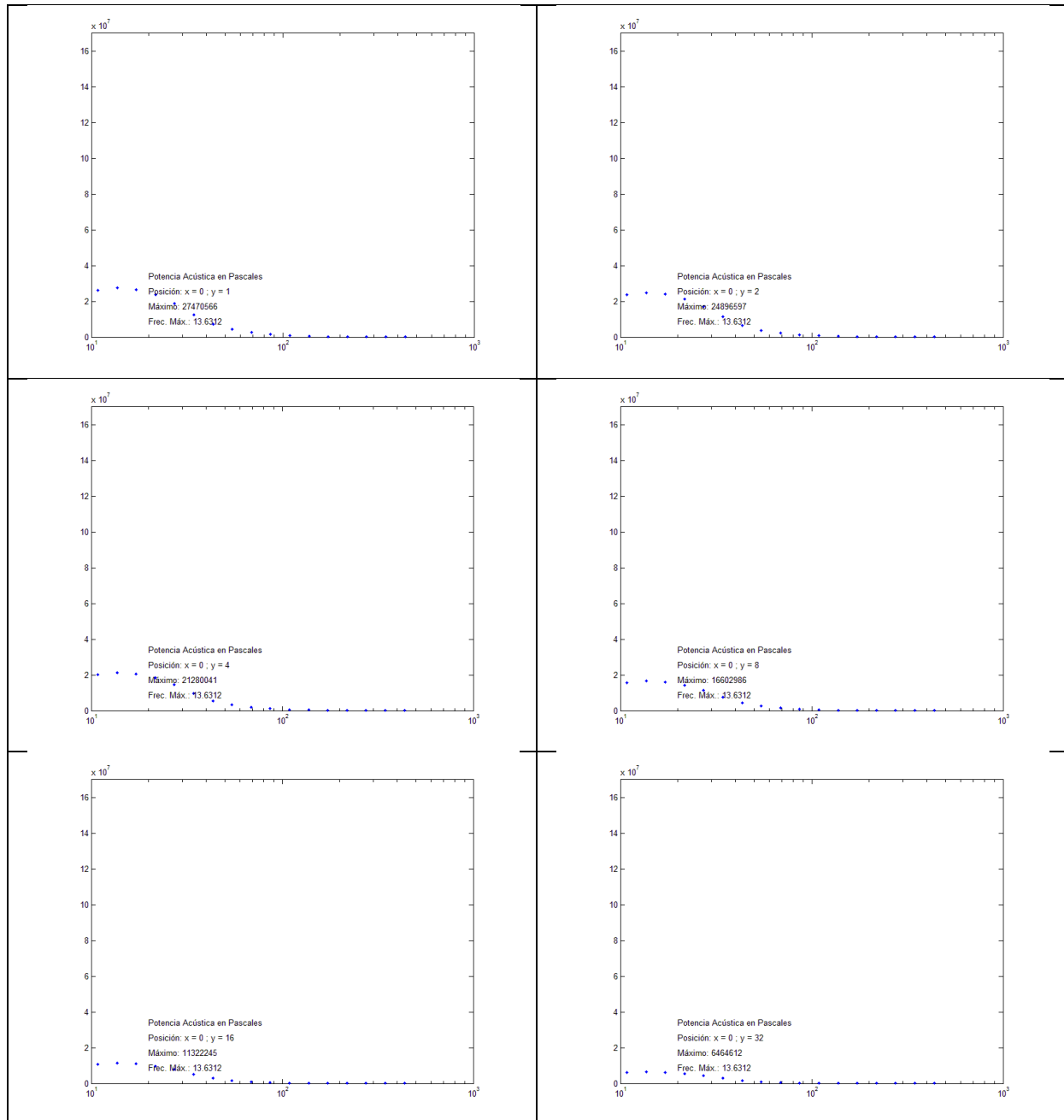
Figura 9.- Potencia Acústica con deflector 100°.



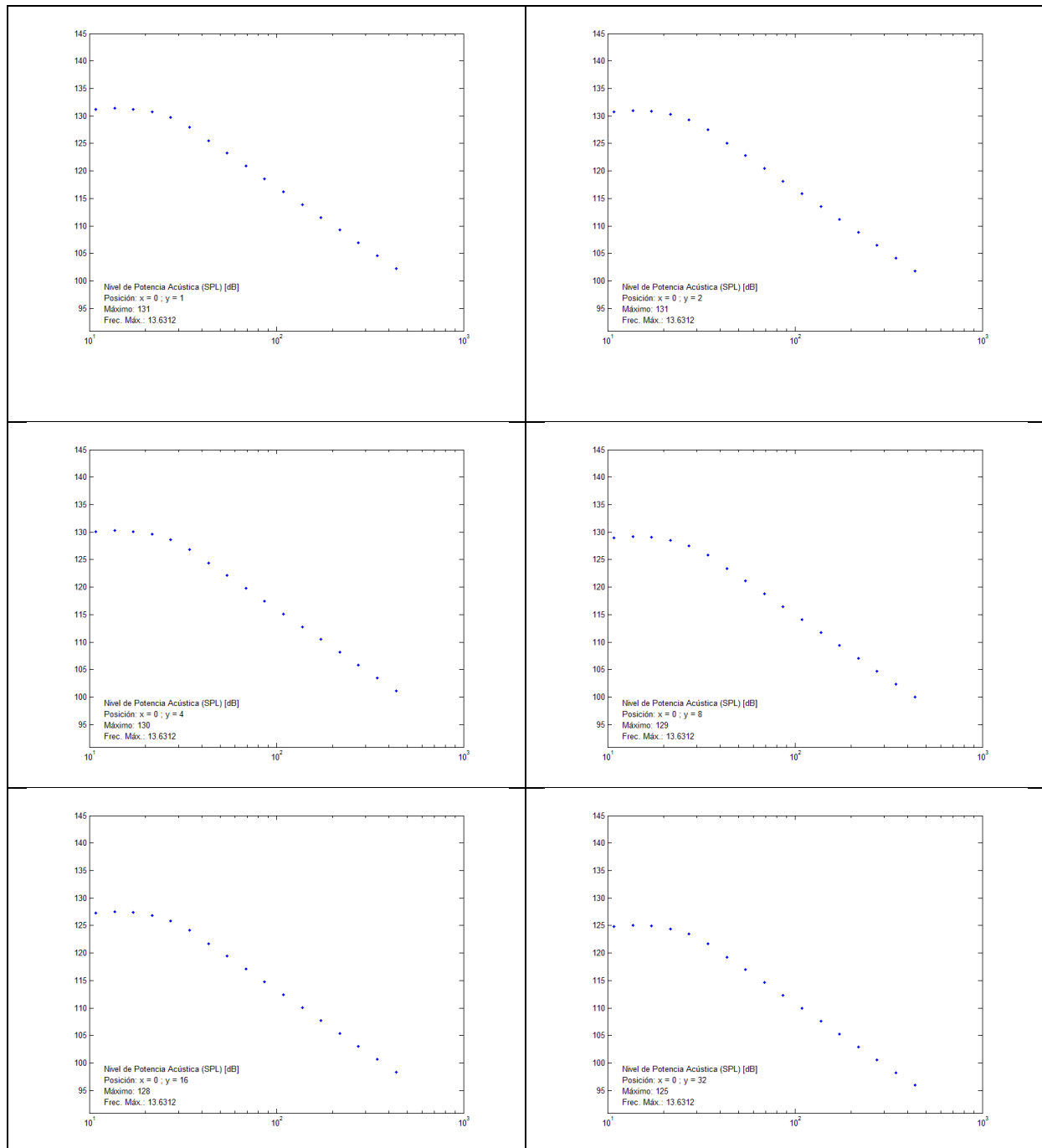
**Figura 10.** Nivel de Potencia Acústica con deflector 100°.

## APÉNDICE B

Resultados de los cálculos para el modelo sin deflector.



**Figura 11.-** Potencia Acústica sin deflector 90°.



**Figura 12.** Nivel de Potencia Acústica sin deflector 90°.